

Влияние устройства системы воздушного охлаждения на усушку при хранении продуктов

Канд. техн. наук Ю. А. МИРОНЧУК, д-р техн. наук **В. П. ЧЕПУРЕНКО**
Mironchuk_YA@i.ua

Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В. С. Мартыновского
Одесской национальной академии пищевых технологий
65082, Украина, г. Одеса, ул. Дворянская, 1/3

Для анализа усушки в камерах холодильного хранения применена теория работы сушильных установок. Показано, что интенсивность усушки в решающей мере зависит от схемы циркуляции воздуха по объему камеры хранения. Описано теоретическое устройство камер хранения, в которых обеспечивается максимально возможная и минимально возможная интенсивности усушки. Проведен анализ совершенства существующих конструкций камер хранения.

Ключевые слова: камера хранения, усушка, система охлаждения.

Influence the design of the air cooling system on drying-up in storage products

Ph. D. Y. A. MIRONCHUK,
D. Sc. **V. P. CHEPURNENKO**

Mironchuk_YA@i.ua

The institute of Refrigeration, cryogenic technologies and ecological energetics named Martynovsky V. S. of Odessa National Academy of Food Technologies

The theory of the work of drying installations was used for the analysis the process of drying-up in the chambers of cold storage. It is shown that the intensity of drying-up in crucially depends on the scheme circulation the flows of air in the volume of chamber storage. Describes theoretical constructions of the chambers of cold storage in which is possible to ensure the maximum intensity of drying and to ensure the minimum intensity of drying. The analysis of perfecting for existing constructions of the chambers of storage was made.

Keywords: chamber of cold storage, drying-up, system of cooling.

Усушка — это уменьшение массы продукта из-за испарения (сублимации) из него влаги при холодильной обработке или хранении. Исторически исследование и разработка теории процесса усушки развивались по нескольким направлениям, в каждом из которых за основу принимались разные факторы — осушающее воздействие камерных приборов охлаждения, массообменные свойства поверхности продукта, массообменные свойства влажного воздуха. Сосуществование разных направлений предопределяет необходимость их интеграции и выработки единого подхода. Поскольку характер протекания процессов тепло- и массообмена в холодильной камере зависит от особенностей циркуляции воздушных потоков, то в основе рассмотрения процессов усушки должен

лежать анализ путей движения воздуха по объему камеры и составляемые на его основе тепловой и материальный балансы, как это принято в теории сушильных установок.

Холодильная камера изолирована от атмосферы. Циркуляция воздуха в ней происходит по замкнутому контуру. Начальные значения параметров состояния воздуха задаются его обработкой в камерных приборах охлаждения.

При теоретическом рассмотрении (рис. 1) процесс изменения состояния воздуха при его обработке в поверхностных воздухоохладителях состоит из двух частей. На входном участке воздухоохладителя в процессе 1–2 отводится только явное тепло. Этот процесс протекает при $\delta = \text{const}$ до достижения воздухом точки росы. После этого начинается выпадение влаги на теплообменную поверхность и дальнейшее охлаждение воздуха в процессе 2–3 идет с отводом и явного и скрытого тепла при $\phi = 1$. Процесс 2–3 идет в направлении точки 0, характеризующей температуру стенки теплообменной поверхности.

Для холодильной камеры в целом организация схем циркуляции воздуха, удобных для теоретического анализа и расчета процессов усушки, требует изолирования боковых поверхностей скважистого штабеля продукта

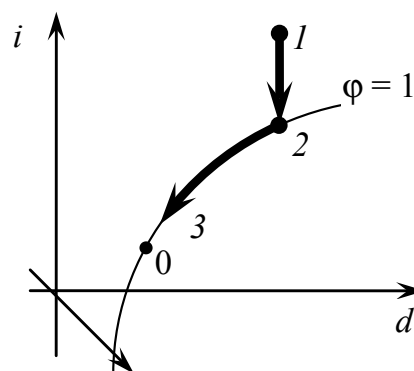


Рис. 1. Охлаждение и осушение влажного воздуха в поверхностном воздухоохладителе

от внутрикамерной среды — чтобы исключить нежелательные пути воздушных и тепловых потоков. Чтобы исключить из рассмотрения влаготпритоки от дыхания людей и с вентиляционным воздухом, удобно принять, что персонала в камере нет — в этом случае поступление влаги возможно только от усушки продукта.

Теоретическая схема холодильной камеры с наилучшей схемой циркуляции воздуха показана на рис. 2. По устройству и принципу работы она идентична конструкции сушильной установки с нормальным сушильным процессом и, соответственно, обеспечивает максимальную интенсивность усушки.

Воздух, выйдя из теплообменного пучка воздухоохладителя, движется снаружи изолированного штабеля, воспринимая по пути теплоприток от вентилятора с электродвигателем и теплоприток через ограждение камеры — процесс 1–2 происходит при $d = \text{const}$. Далее воздух совершает процесс 2–3 внутри штабеля, в котором отдает продукту тепло и отводит от продукта влагу. Затем воздух возвращается в воздухоохладитель, где в процессе 3–4–1 охлаждается и осушается до состояния 1.

Тепло, воспринимаемое воздухом в процессе 1–2

$$Q_{1-2} = Q_{эл} + Q_{огр} \quad (1)$$

$$Q_{1-2} = G_B (i_2 - i_1) \quad (2)$$

Если продукт не содержит внутренних источников тепла, то внутри изолированного штабеля он получает тепло только от воздуха. Тепло, воспринятое продуктом, тратится на испарение из него влаги. Образовавшийся пар растворяется в воздухе и возвращает ему в скрытой форме то тепло, которое ранее было отобрано от воздуха в явной форме. Поскольку количества отобранного и возвращенного тепла одинаковы, то процесс 2–3 внутри штабеля идет при $i = \text{const}$.

Для процессов в камерах хранения скорость диффузии влаги из глубины продукта выше, чем скорость ее испарения из поверхности. Водяной пар над поверхностью продукта находится в насыщенном состоянии. Интенсивность усушки определяется только скоростью массоотдачи — это значительно упрощает расчеты кинетики процесса 2–3 и позволяет воздуху приближаться к состоянию насыщения М.

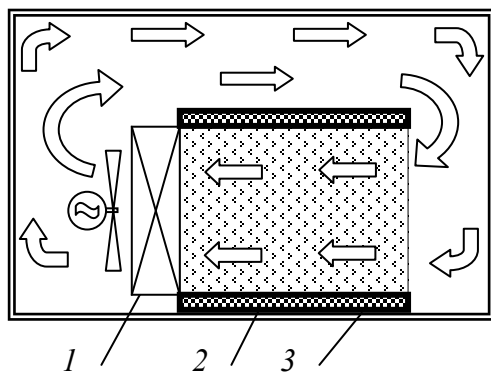


Рис. 2. Вытяжная схема активного вентилирования изолированного штабеля: 1 — воздухоохладитель; 2 — штабель продукта; 3 — изоляция штабеля

Абсолютная усушка продукта в процессе 2–3 определяется теплопритоком к продукту, деленным на удельную теплоту парообразования

$$G_w = \left(\frac{d_3 - d_2}{d_M - d_2} \right) \frac{Q_{1-2}}{r} \leq \frac{Q_{1-2}}{r} \quad (3)$$

$$G_w = G_B (d_3 - d_2) \quad (4)$$

Наибольшая интенсивность усушки будет в том случае, когда воздух при прохождении через штабель достигает состояния насыщения М. При недостижимости воздухом состояния М тепловая нагрузка воздухоохладителя остается неизменной, а усушка снижается

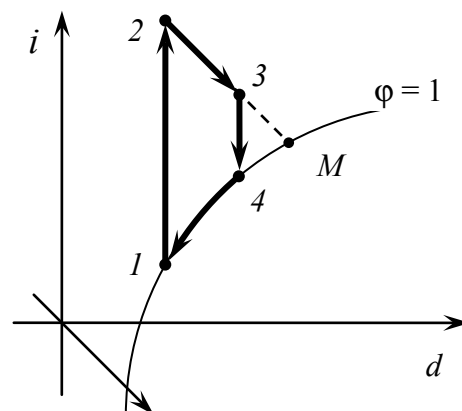
$$Q_{3-1} = G_B (i_3 - i_1) = G_B (i_M - i_1) \quad (5)$$

$$G_w = G_B (d_3 - d_1) < G_B (d_M - d_1) \quad (6)$$

Если продукт содержит внутренние источники тепловыделений, то они суммируются к теплопритоку Q_{1-2} в уравнении (3) и увеличивают усушку. Процесс изменения состояния воздуха внутри штабеля в этом случае отклоняется от адиабатного и идет с приростом энтальпии на величину, определяемую поступлением тепла от продукта.

Наилучшая схема циркуляции камерного воздуха показана на рис. 3. Боковые поверхности штабеля продукта изолированы. Воздух покидает воздухоохладитель с состоянием 1 и подается в штабель продукта с $\phi = 1$. Температура и парциальное давление водяного пара в пограничном слое у поверхности продукта характеризуются точкой П, также лежащей на линии $\phi = 1$. Положение точки П самоустанавливается относительно параметров точки 1 так, чтобы обеспечивались условия для отвода тепла и влаги, выделяемых продуктом. Воздух, вентилирующий штабель, в процессе 1–2 получает от продукта и явное и скрытое тепло. Единственно возможный путь протекания процесса 1–2 — при $\phi = 1$. Покинув штабель, воздух в процессе 2–3 воспринимает сухим путем теплоприток через ограждение и теплоприток от вентилятора и далее направляется в трубный пучок воздухоохладителя, где совершает процесс 3–2–1 охлаждения и осушения.

В рассматриваемом случае энергообеспечение усушки производится только внутренними тепловыделениями продукта. Причем, на парообразование тра-



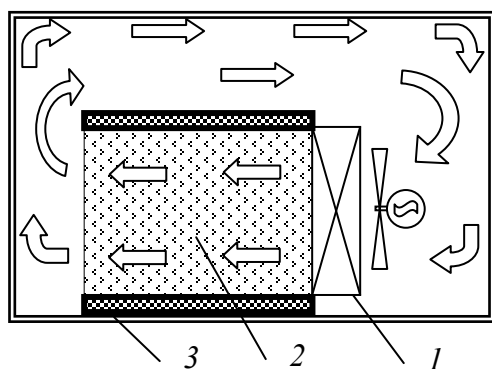


Рис. 3. Приточная схема активного вентилирования изолированного штабеля: 1 — воздухоохладитель; 2 — штабель продукта; 3 — изоляция штабеля

тится только часть их мощности, определяемая тепловлажностным отношением ϵ процесса при $\phi = 1$

$$G_w = \frac{Q_{\text{внутр}}}{\epsilon} < \frac{Q_{\text{внутр}}}{r} \quad (7)$$

При отсутствии в продукте внутренних тепловыделений температура продукта в штабеле установится равной температуре насыщенного воздуха на выходе из воздухоохладителя, усушка продукта будет отсутствовать.

Для идеализированных схем, показанных на рис. 2, 3, наличие изолирующей оболочки штабеля позволяет четко разделить камерные теплопритоки на те, которые вызывают усушку и на те, которые на усушку не влияют. Обе группы теплопритоков легко вычислимы в рамках стандартной методики расчета теплопритоков в холодильную камеру, что позволяет довольно просто построить процесс изменения состояния воздуха в камере и определить усушку расчетным путем.

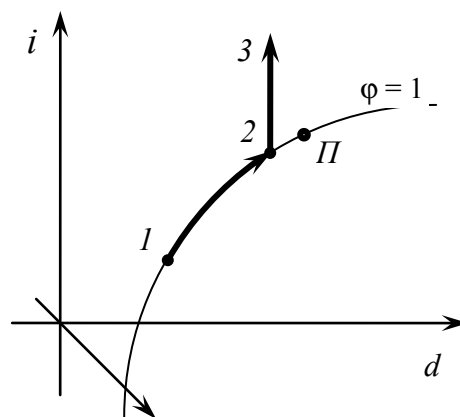
В реальных условиях, при отсутствии изолирующей оболочки штабеля, поверхность продукта дополнительно совершает лучистый теплообмен с внутренними поверхностями ограждения камеры и конвективный теплообмен с воздухом, движущимся снаружи штабеля — эти теплопритоки создают дополнительное энергообеспечение для испарения влаги с продукта.

Величина усушки в камере с неизолированным штабелем

$$G_w = \frac{Q_{\text{внутр}}}{\epsilon} + \sum \frac{k_i Q_i}{\epsilon} \quad (8)$$

где k_i — коэффициент, указывающий, какая доля каждого вида Q_i внешнего теплопритока воспринята поверхностью продукта.

Поскольку значения коэффициентов k_i зависят от влияния множества факторов, трудно поддающихся учету, в том числе и случайных (открывание дверей, перемещения персонала и т.п.), то обоснованный выбор либо расчет числовых значений этих коэффициентов затруднителен. Также затруднительно и определение долей воздушного потока, которые полностью либо частично не участвуют в вентилировании штабеля. То есть, для камеры с неопределенной схемой движения воздушных потоков невозможно надежное расчетное определение величины усушки.



Основные принципы создания камерных систем охлаждения, обеспечивающих минимизацию усушки, давно установлены, достаточно полно обоснованы и изложены в литературе [1, 2]. Так, для минимизации усушки при хранении замороженных продуктов должны выполняться основные условия:

- перехват теплопритоков на пути к продукту;
- стабилизация температуры продукта;
- относительная влажность воздуха в штабеле продукта $\phi = 100\%$.

Однако попытки обеспечить выполнение этих условий без создания надлежащей схемы циркуляции воздуха по объему камеры способны привести к результатам, противоположным ожидаемым.

На рис. 4 показана схема циркуляции воздуха по объему камеры, описанная в работе [1]. В охлаждаемом помещении создается своеобразный технический этаж, на котором могут быть размещены воздухоохладители. Своеобразие такой конструкции еще состоит в том, что помещение над ложным потолком оказывается теплозащитной рубашкой, локализующей теплоприток через покрытие.

При рассмотрении данной схемы нетрудно увидеть, что охлажденный воздух после выхода из трубного пучка воздухоохладителя воспринимает теплоприток от вентилятора, затем теплоприток через часть покрытия, затем теплоприток через боковые стены ограждения и только после этого поступает к продукту. При этом воздух доставляет к продукту все те теплопритоки, которые им были «локализованы» по пути от трубного пучка к штабелю, устройству и работа такой системы охлаждения соответствуют схеме, показанной на рис. 2, которая обеспечивает наивысшую интенсивность усушки.

Аналогичные недостатки присущи и типичной схеме с подвесными воздухоохладителями (рис. 5) [1].

Повышенную усушку создает также и система воздушного охлаждения с канальным распределением воздуха, в которой для локализации поступающей снаружи конвективной теплоты нагнетательные каналы чаще размещают у наружных стен, а окна для подачи воздуха выполняют на нижней поверхности канала; при таком расположении каналов и окон холодный воздух, выходящий из окон, создает воздушную завесу у наружных стен. Всасывающие каналы обычно раз-

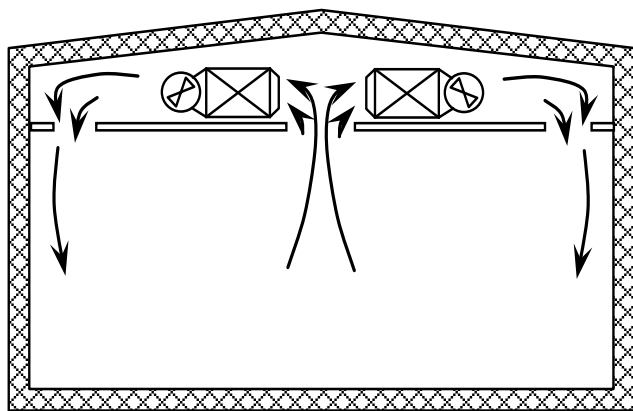


Рис. 4. Система охлаждения с воздухоохладителями, расположенными на техническом этаже

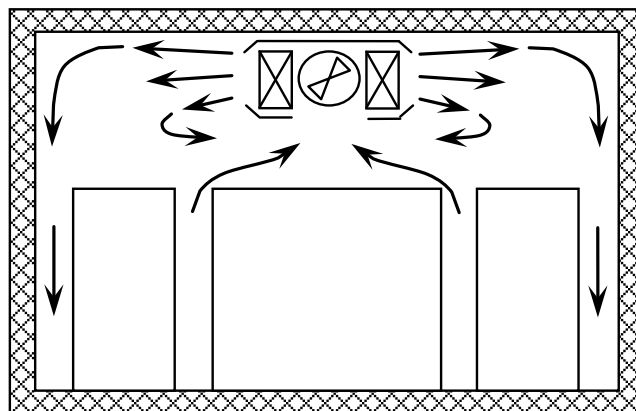


Рис. 5. Система охлаждения с одним воздухоохладителем на пролет

мещают у внутренних стен, а их окна — на боковой поверхности канала, с тем, чтобы удалять более легкий теплый и влажный воздух [1].

В рассмотренных примерах неудачных конструкций систем охлаждения общая ошибка — неправильная организация циркуляции воздуха по объему камеры.

Для минимизации усушки схемы циркуляции воздуха в камерах хранения мороженных грузов должны быть максимально приближены к рассмотренной на рис. 3. Для этого:

1. Конструкции воздухоохладителей должны обеспечивать охлаждение воздуха до состояния максимально приближенного к насыщенному. Воздухоохладители должны иметь шахматные пучки большой глубины, обеспечивающие интенсивное перемешивание потока и не допускающие сквозного прорыва (байпасирования) неохлажденных струй воздуха. Вентиляторы по ходу воздуха должны устанавливаться до трубного пучка.

2. Воздух от приборов охлаждения к продукту должен поступать кратчайшим путем, исключаяющим восприятие им на этом пути любых видов теплопритоков.

3. Путь обратного потока воздуха от продукта к воздухоохладителю должен быть организован так, чтобы воздух на нем воспринимал максимально возможное количество камерных теплопритоков и транспортировал их к трубному пучку, не допуская поступления этих теплопритоков к продукту.

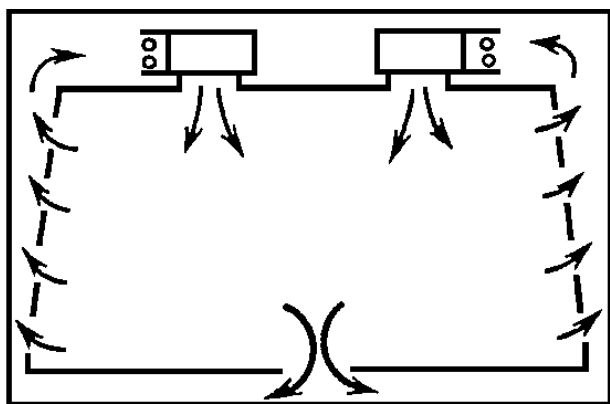
4. Возможность смешивания прямого и обратного потоков воздуха должна быть исключена, а если это невозможно — то сведена к минимуму.

5. По возможности штабель продукта должен быть изолирован от внутрикамерной среды — чтобы обеспечить направленную циркуляцию вентилирующего воздуха в штабеле и чтобы исключить поступление к продукту любых видов камерных теплопритоков за исключением внутренних тепловыделений продукта.

6. Для тех случаев, когда температура продукта понижена до температуры хранения, интенсивность вентилирования штабеля должна сводиться к минимуму. Но при этом необходимо сохранять высокую интенсивность охлаждения пространства между штабелем и ограждением для перехвата и отвода других видов камерных теплопритоков. В совокупности это предопределяет необходимость разделения камерной системы охлаждения на две подсистемы — одна для активного вентилирования штабеля, другая для отвода теплопритоков из пространства за пределами штабеля. Должна обеспечиваться возможность раздельного управления интенсивностью работы каждой из подсистем.

7. Требование изолирования штабеля не всегда выполнимо — нарушается доступ для проведения грузовых операций. В таких случаях для снижения лучистого теплообмена между продуктом и ограждением необходимо экранирование. Продукты между экраном и ограждением должны вентилироваться потоком воздуха, который возвращается из грузового объема к воздухоохладителю.

а



б

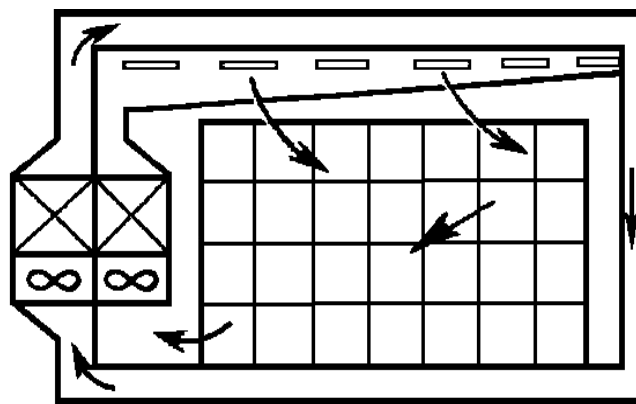


Рис. 6. Схемы систем охлаждения, обеспечивающие минимизацию усушки: а — воздушно-экранная; б — с одноканальной теплозащитной рубашкой.

8. При невозможности устройства экранирования, для внутренних поверхностей ограждения необходимо применять покрытия с низкой степенью черноты, что минимизирует лучистый теплообмен между продуктом и ограждением. В проходе между штабелем и ограждением движение воздуха должно быть организовано только от продукта к воздухоохладителю.

9. Примеры схем систем охлаждения, устройства и принцип работы которых в достаточной мере удовлетворяют вышеперечисленным требованиям по минимизации усушки, приведены на рис. 6 [2]. Подобные схемы должны применяться в камерах хранения замороженных продуктов.

Применительно к камерам хранения охлажденной плодоовощной продукции, насыщенное состояние воздуха внутри штабеля недопустимо, поскольку при этом возникают условия для развития плесени и другой микрофлоры. В зависимости от вида плодоовощной продукции, для ее хранения требуется относительная влажность 75÷95%. Чтобы устройство и работа системы охлаждения обеспечивали подачу в штабель охлаждающего воздуха с требуемой относительной

влажностью, трубные пучки воздухоохладителей камер хранения плодоовощной продукции должны иметь малую глубину для возможности байпасирования части воздушного потока. Вентиляторы с электродвигателями должны устанавливаться на выходе из трубного пучка и обеспечивать частичный подогрев воздушного потока для снижения его относительной влажности. Относительную влажность воздуха также можно снижать перехватом внешних теплопритоков на пути воздушного потока от воздухоохладителя к штабелю.

В целом, рациональная организация схемы циркуляции воздуха по объему камеры выступает определяющим фактором в создании надлежащих условий для сохранности продукта и минимизации потерь от усушки.

Список литературы

1. *Курылев Е. С.* Холодильные установки. /Е. С. Курылев, В. В. Оносовский, Ю. Д. Румянцев. 2-е изд., стереотип. — СПб.: Политехника, 2002.
2. *Чумак И. Г., Чепурненко В. П.* и др. Холодильные установки. — М.: Агропромиздат, 1991.

Календарь выставок «Осень 2013»

Октябрь

7–11 АГРОПРОДМАШ–2013

18-я международная выставка.

Оборудование, машины и ингредиенты для пищевой и перерабатывающей промышленности

Москва, ЦВК «Экспоцентр»

Орг.: ЗАО «Экспоцентр»

Тел.: +7 (499) 795-37-35, факс: +7 (495) 609-41-68

www.agroprodmarsh-expo.ru

apm@expocentr.ru

22–24 РОСБИОТЕХ–2013

Москва, ЦВК «Экспоцентр»

Орг.: Минобрнауки России, Минсельхоз России

Тел./факс: +7 (495) 961-20-12, +7 (499) 760-33-04

www.rosbiotech.com, www.salonexpo.ru

brg00@mail.ru

29.10–01.11 PCVEXPO

12-я международная выставка. Насосы. Компрессоры.

Арматура. Приводы и двигатели

Москва, МВЦ «Крокус Экспо»

Орг.: МВК (в составе группы компаний ITE)

Тел.: +7 (495) 935-8100

www.pcvexpo.ru

info@mvk.ru

Ноябрь

13–15 ПЕТЕРФУД 2013

Международная продовольственная выставка

Санкт-Петербург, ВЦ «Ленэкспо»

Орг.: КВК «Империя»

Тел./факс: +7 (812) 327-49-18

www.peterfood.imperiaforum.ru/

imperia@imperiaforum.ru

26–29 ЮГАГРО

20-я Международная агропромышленная выставка

Краснодар, «Кубань ЭКСПОЦЕНТР»

Орг. «КраснодарЭКСПО»

в составе группы компаний ITE

Тел./факс: +7 (861) 200-12-34, +7 (861) 200-12-54

www.yugagro.org

27–29 КРИОГЕН-ЭКСПО–2013

12-я международная специализированная выставка

Москва, ЦВК «Экспоцентр»

Орг.: ООО «БК «Мир-Экспо»

Тел.: +7 (499) 618-05-65, факс: +7 (499) 618-36-83

www.cryogen-expo.ru

info@cryogen-expo.ru